第39卷　第6期
2022年11月
干 旱 区 研 究
ARID　ZONE　RESEARCH
Vol. 39　No. 6
Nov.　2022

1956—2021年疏勒河流域主要河流出山径流变化及成因分析

王学良[1,2,3]，　陈仁升[1]，　刘俊峰[1]，　韩春坛[1,3]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 黑河上游生态—水文试验研究站，甘肃　兰州　730000；
2. 甘肃省平凉水文站，甘肃　平凉　744000；3. 中国科学院大学，北京　100049）

摘　要：基于1956—2021年疏勒河、石油河和党河出山口水文站的实测径流量和托勒气象站以及再分析气象数据，采用Sen's slope估计法、Mann-Kendall检验法，分析了3条河流径流变化特征及其成因。结果表明：（1）1956—2021年3条河流出山径流量变化均为增加趋势，其中疏勒河和党河为显著性增加趋势，石油河为非显著性增加趋势。（2）3条河流突变年份分别在1998年、2007年和1982年，突变后径流量显著增加，疏勒河变化率为60%，石油河和党河大约为20%。（3）疏勒河和石油河径流量在2000s后为研究时段丰水期，而党河在1980s后缓慢增加并在2020s初出现历史丰水值。（4）受波动性降水增加和1986年后加速上升的气温所引起冰川加速消融等原因的共同影响，3条河流出山径流量的年平均和各季节流量均为增加态势。

关键词：疏勒河流域；出山径流；变化；成因分析

IPCC6报告显示，全球变暖已经成为气候变化的大趋势[1]。气候变化导致的气温升高、区域降雨增加或减少，冰雪消融和冻土退化等，引起了区域水循环过程发生改变。在近百年中国气候变暖趋势的影响下[2-4]，过去60 a中国主要江河以及发源于青藏高原的长江黄河和雅鲁藏布江等河流水资源量出现了新的变异特征[5-6]。然而，对于生态环境相对较脆弱的西北干旱半干旱内陆河流域，气温和降水等气象要素已经发生改变并引起了广泛关注[7-11]，受此影响，河流径流量和流域水资源量也出现了新的变化趋势和特征[12-15]。疏勒河流域作为河西走廊三大内陆河流域之一，深居西北内陆腹地，受气候变化影响，流域出山径流量发生了较大变化，也引起了诸多学者的关注[16-25]。流域内气温、降水等气象要素和径流的变化规律，对于整个区域社会经济发展，科学利用与管理流域水资源等工作具有重要的意义。

祁连山区因特殊的地理位置，从东至西受东亚季风、高原季风、南亚季风和西风带的交汇影响[10-11]。疏勒河位于河西走廊西部，流域内高大山系分布较多，水汽在高山峻岭间传输，降水量相对较少，高山区冰川和积雪发育，径流主要由降水和冰雪融水形成。区域内社会经济发展所需的水资源大部分来自祁连山山区河流。流域内有疏勒河、石油河和党河等主要河流，山区河流径流量的趋势增加或减少对流域内水资源管理，酒泉市、玉门市、瓜州县和敦煌市等中下游地区社会经济的可持续发展和生态建设举足轻重。因此针对疏勒河流域主要河流出山径流量的变化开展研究，分析历史时期的变化规律，有利于疏勒河流域合理配置水资源，制定科学的区域水资源管理方案。

关于疏勒河流域气候变化背景下径流量变化特征的分析主要集中在东部的疏勒河干流[16-25]。如李培都等[16]分析和模拟了1972—2011年疏勒河径流量变化特征，结果表明疏勒河干流昌马堡、党城湾、双塔堡、潘家庄4个站点年径流量均呈增加趋势，出

收稿日期：2022-06-13；　**修订日期：**2022-08-02
基金项目：国家自然科学基金"雪面雨侵蚀积雪过程模拟实验研究"（42171145）；甘肃省自然科学基金"祁连山流域中小河流洪水特征变化与预警预报方案研究"（21JR7RA043）资助
作者简介：王学良（1982-），男，博士研究生，高级工程师，主要从事寒旱区水文与水资源研究. E-mail: wangxueliang@nieer.ac.cn
通讯作者：陈仁升. E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

山口昌马堡站每10 a增加13.87%，突变年份在2004年；张鹏等[17]分析表明，1956—2011年疏勒河气温、降水量和径流量均呈上升趋势，且突变点发生在1997年；孙栋元等[18]利用1953—2014年昌马堡站资料，分析表明径流变化为增加趋势；张文春[19]研究发现，1956—2017年出山口昌马堡站径流量为增加趋势，突变点在1998年，且多年平均流量1998—2017年比1956—1997年增加了56.1%；李洪源等[20]和Wu等[21]利用寒区分布式水文模型SPHY，对疏勒河上游径流组分及其变化特征进行了定量模拟，结果显示冰川径流、融雪径流、降雨径流和基流分别占总径流量的比例为30.5%、12.9%、13.5%和43.1%，且由于气温和降水为增加趋势，故冰川径流和降雨径流均呈增加趋势，平均增加幅度分别为$4.66\times10^6\ m^3\cdot a^{-1}$和$2.46\times10^6\ m^3\cdot a^{-1}$，融雪径流呈减少趋势，平均减少幅度为$1.01\times10^6\ m^3\cdot a^{-1}$；蓝永超等[22]认为，1960—2011年河西内陆河石羊河、黑河和疏勒河三大水系上游山区气温总体为上升态势，且疏勒河年平均气温突变时间为1990s后期；降水总体上亦为增加态势，但年际波动剧烈，年径流量增加的主要贡献为冰雪融水；李计生等[23]研究发现，1956—2013年疏勒河各河流径流量为持续增加趋势，地下水补给量占径流量的40.46%，且2014—2018年疏勒河干流出山径流量偏丰；李雅培[24]利用1981—2015年疏勒河流域气温、降水和径流等要素，采用分布式水文模型PRMS模拟了未来不同情景下疏勒河山区流量的变化趋势，表明疏勒河出山径流量总体呈增加趋势；杨春利等[25]研究表明，1956—2015年疏勒河出山径流量为增加趋势，1990s后增加明显，气温对径流的影响超过60%，而降水的影响为30%左右。以上研究成果为疏勒河流域水资源综合规划和科学管理提供了技术支撑。

关于疏勒河流域的研究多集中在疏勒河干流或单独一个河流，研究重点主要侧重于气温、降水量和径流量的演变趋势、突变年份和丰枯时段等方面。针对过去几十年疏勒河整个流域和主要河流的出山径流量变化特征的差异及成因分析方面仍然缺少系统分析。故本文拟选取整个疏勒河流域为研究区，探究1956—2021年疏勒河、石油河和党河3条主要河流的气温、降水和径流等要素的变化特征及差异，以期为疏勒河流域水资源的综合管理与开发利用提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

疏勒河流域地处河西走廊西端，位于92°11′~98°30′E，38°00′~42°48′N之间，主要河流从东至西分别有疏勒河、石油河和党河（图1）。疏勒河发源于祁连山脉的岗格尔肖合力岭，河源高程4737 m，干流由东南向西北穿行于托来南山与疏勒南山之间，干流全长583 km，集水面积$4.13\times10^4\ km^2$，从河源到昌马峡出山口（昌马堡水文站）干流长347 km；石油河发源于照壁山中部，河源高程4000多米，河流全长约130 km，主要由高山、峡谷、浅山低山区及戈壁和盆地组成；党河地处疏勒河最西端，发源于疏勒南山的崩坤大坂、宰里木克和党河南山的巴音泽尔肯乌勒、诺干诺尔的冰川群；主流由东南向西北流，干流全长379 km。研究区总体气候呈现高原山地气候特征。

1.2　数据资料

选取疏勒河昌马堡站、石油河玉门市站和党河党城湾站为研究对象。气象数据采用中国区域地面气象要素驱动数据集（1979—2018）（国家青藏高原科学数据中心）的再分析数据[26-28]，考虑到疏勒河流域无国家气象站，选择流域内的鱼儿红和临近托勒的气象数据做参考分析。水文和气象站点信息如图1和表1所示，径流数据为3条河流的水文站1956—2021年实测值，径流数据和鱼儿红气象站数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》；托勒气象站气温和降水量数据来自于中国气象局信息中心（http://data.cma.cn）。

1.3　研究方法

1.3.1　Sen's slope估计　采用Sen's slope估计[29]分析研究区各水文站年径流量变化趋势。

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_k}{j - k}\right),\ j > k$$

式中：x_j和x_k为时间序列数据，且x_j和x_k代表时间j和k的数据值。β符号大于或小于0反映趋势是上升或下降，其值表示趋势的斜率倾斜程度。

1.3.2　Mann-Kendall检验法　采用Mann-Kendall检验法（M-K检验）对研究区3条河流和气象站点的径流量、气温和降水量等变化进行趋势和突变检验。M-K检验法是一种被世界气象组织推荐且广泛用于

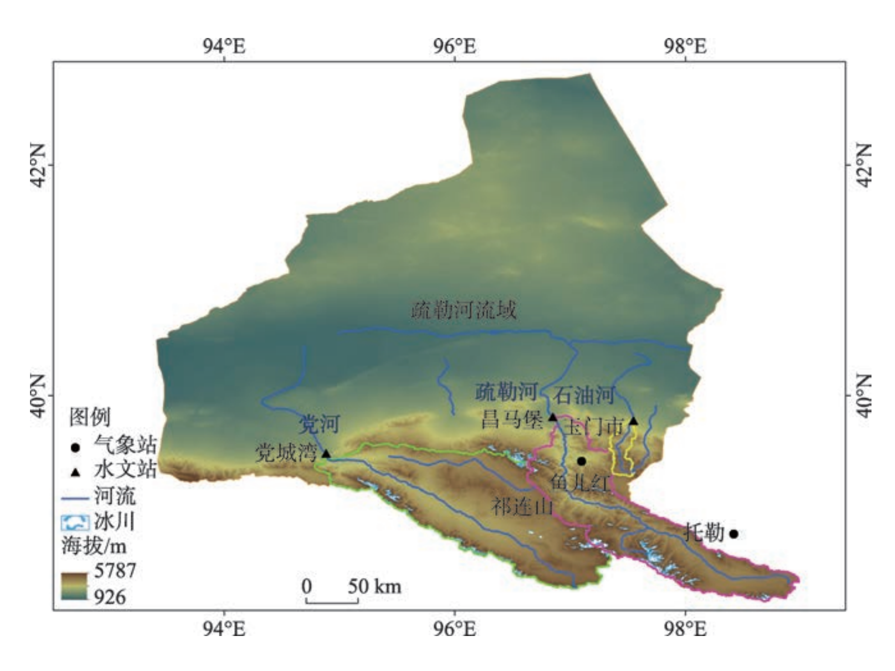


图1 研究区水文站气象站位置

Fig. 1 Location of hydrological stations and meteorological stations in the study area

表1 研究区水文站和气象站信息

Tab. 1 Basic information of hydrological stations in the study area

河流	水文站/气象站	观测项目	控制面积/10⁴ km²	海拔/m	经度	纬度	资料系列
疏勒河	昌马堡	流量	1.0961	2080	96°51′	39°49′	1956—2021年
石油河	玉门市	流量	0.0656	2300	97°33′	39°47′	1978—2021年
党河	党城湾	流量	1.4325	2 176	94°53′	39°30′	1966—2021年
	托勒	气温、降水		3367	98°25′	38°48′	1956—2021年
	鱼儿红	降水		3030	97°06′	39°26′	1956—2021年

水文和气象等时间序列趋势特征分析的非参数检验方法，其详细表达式见参考文献[30-31]；其优点在于所选的样本不一定服从正态分布，也不受个别奇异特征数值的影响。

2 结果与分析

2.1 径流年际变化特征

2.1.1 年际和季节变化 由图2和表2可知，从线性变化趋势来看，疏勒河、石油河和党河平均径流量均为增加趋势。Sen's slope估计变化率(表2)显示，疏勒河和党河较大，分别为0.015和0.020，而石油河较小，为0.002。但从3条河流的5 a滑动平均可以看出，疏勒河从1956—1998年为平稳期，1999年之后为增加趋势；石油河1978—1995年为减小趋势，1996—2013年为增加趋势，随后5 a又出现减小趋势；党河在1966—1994年为增加趋势，1995—2014年为保持平稳期且略有减少，2015年之后又出现增加趋势。M-K趋势(表2)表明，疏勒河和党河均通过0.01的显著性检验，而石油河未通过0.05的显著性检验。M-K趋势检验结果显示，3条河流径流量季节变化除了石油河春季径流为减小趋势外，其余均为增加趋势。总体来看，疏勒河和党河径流量呈显著性增加趋势，而石油河为非显著性增加趋势。

1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站实测径流量多年变化特征及C_v值如表3所示。疏勒河昌马堡站和石油河玉门市站的C_v值分别为0.31和0.36，年际变化幅度较大，极值比分别为4.22和5.04，而党河党城湾站的C_v值为0.15，年际变化幅度较小，极值比为1.80。3条河流最大年径流量均出现在2010s后期，最小年径流量疏勒河和党河分别

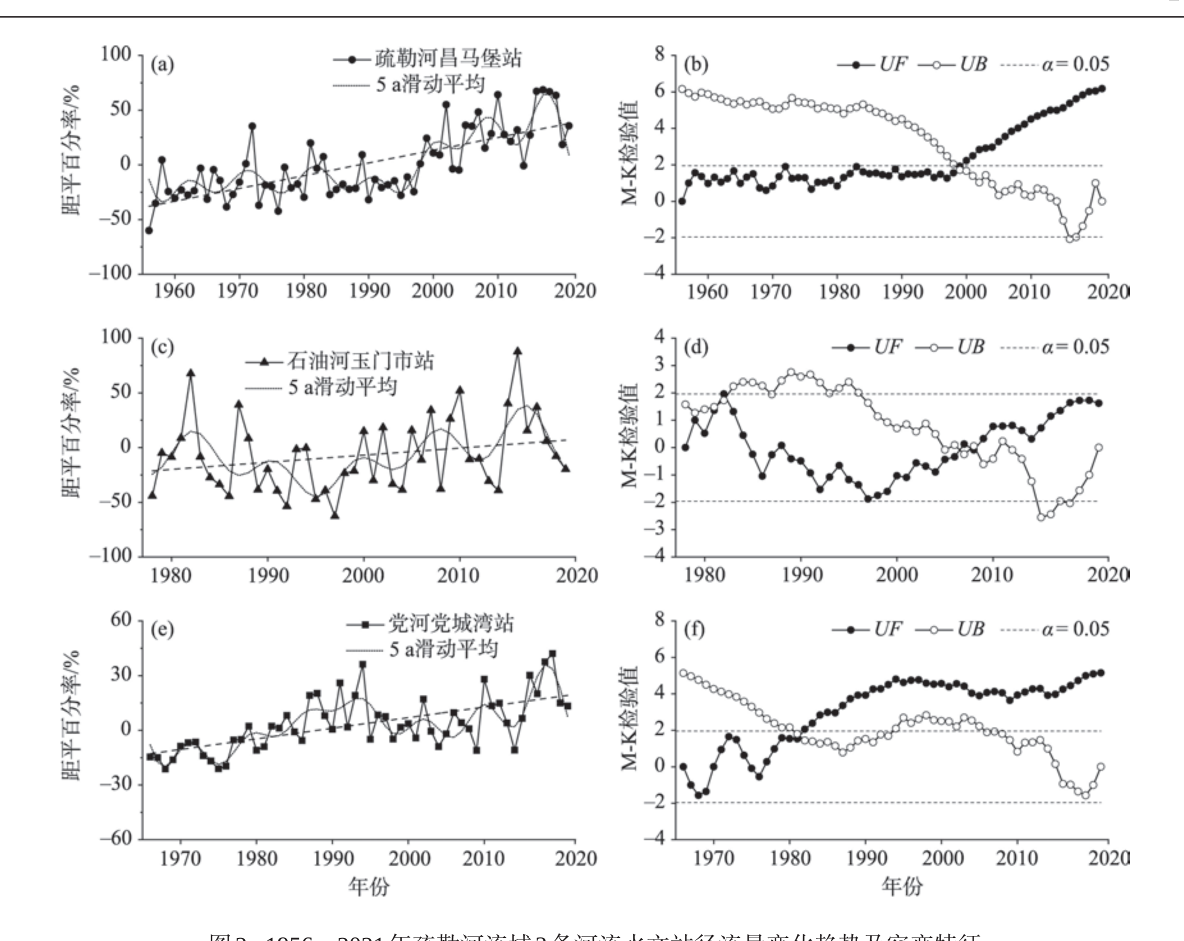


图2　1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站径流量变化趋势及突变特征

Fig. 2　Trends and abrupt change characteristics of runoff at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

表2　1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站径流量变化趋势

Tab. 2　Trends of runoff at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

河流	水文站	Sen's slope估计变化率	M-K趋势检验值				
			年	春	夏	秋	冬
疏勒河	昌马堡	0.115	6.165**	5.966**	5.179**	5.805**	7.676**
石油河	玉门市	0.002	1.588	−0.496	1.001	3.044**	2.316*
党河	党城湾	0.020	5.131**	4.057**	4.806**	4.361**	1.456

注:*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著。

出现在1956年和1968年,而石油河出现在1997年。

2.1.2　年代际变化　从图3可以看出,疏勒河流域3条河流不同年代际变化略微有所不同。疏勒河1990s前为枯水期,2000s开始为丰水期,2010s为丰水期最大值,2020s前期有所减缓;石油河1970s—2000s为枯水期,2010s为丰水期,2020s前期又出现枯水期;而党河1960s—1970s为枯水期,1980s呈现增加趋势,但2000s增加趋势有所减小,到2010s出现丰水期最大值,2020s前期略微下降。总体来看,疏勒河和党河径流演变趋势大致为枯-丰,而石油河为枯-丰-枯。3条河流均在2010s出现研究时段的丰水期峰值。

2.1.3　径流突变特征　从表4可以看出,M-K突变检验结果表明,疏勒河昌马堡站、石油河玉门市站和党河党城湾站的突变年份分别为1998年、2007年和1982年。与突变前相比,突变后3条河流的径流量出现明显的增加,变化率疏勒河最大,为60%,而石油河和党河分别为26%和23%。

2.2　年内径流变化特征

由图4可知,疏勒河流域3条河流径流量年内

表3 1956—2020年疏勒河流域3条河流水文站径流量变化特征

Tab. 3 Runoff characteristics at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2020

河流	水文站	平均径流量/10^8 m³	变差系数C_v	最大年径流量/10^8 m³	出现年份	与多年均值比	最小年径流量/10^8 m³	出现年份	与多年均值比	极值比
疏勒河	昌马堡	10.336	0.31	17.439	2017年	1.69	4.131	1956年	0.40	4.22
石油河	玉门市	0.316	0.36	0.593	2016年	1.88	0.118	1997年	0.37	5.04
党河	党城湾	3.560	0.15	5.057	2019年	1.42	2.804	1968年	0.79	1.80

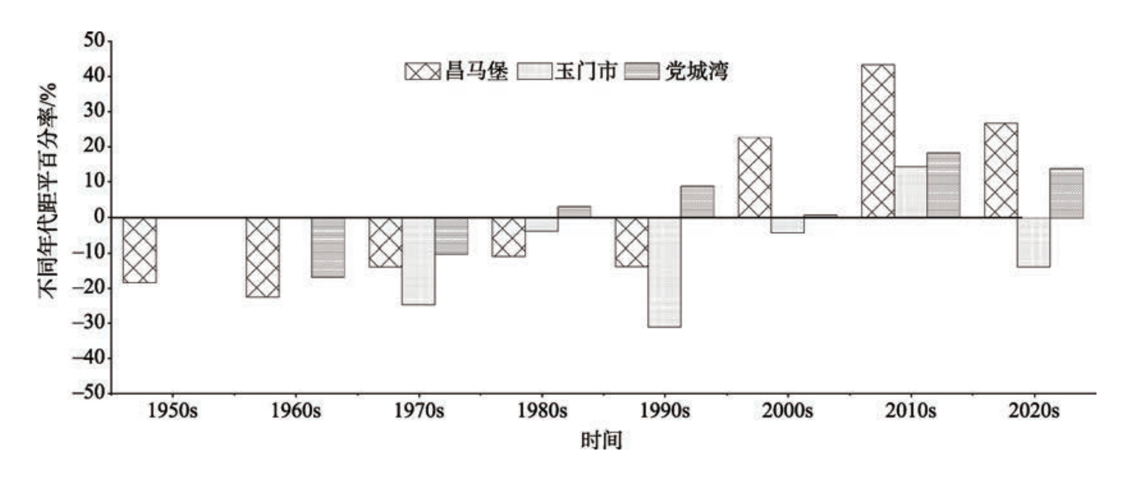


图3 1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站径流量不同年代距平百分率

Fig. 3 Percentage of chronological anomalies at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

表4 1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站径流量突变前后对比

Tab. 4 Comparison of runoff before and after abrupt change at hydrological stations of three rivers in Shule River basin from 1956 to 2021

河流	水文站	M-K突变年份	突变前平均年径流量/10^8 m³	突变后平均年径流量/10^8 m³	变化率/%
疏勒河	昌马堡	1998年	8.543	13.689	60
石油河	玉门	2007年	0.271	0.340	26
党河	党城湾	1982年	3.169	3.892	23

分配极不均匀，疏勒河和石油河最大，为单峰型（7月、8月），而党河相对较小，为双峰型（4月、7月）。疏勒河和石油河径流量主要集中在汛期的6—9月，夏季7—8月径流量最大；而党河径流量年内分配相比疏勒河和石油河较均匀，春季和夏季4—9月径流量最大。

径流量突变后，3条河流年内径流过程线变得更为陡峭，具体表现为峰值增大，秋季退水过程变缓。疏勒河昌马堡站和党河党城湾站冬季径流量增加，石油河无明显变化。在月径流量变化率方面，疏勒河和石油河冬季径流变化率最大，而党河则全年相对较为平缓且较小。

3 讨 论

对于疏勒河流域的3条主要河流来说，上游山区来水量的多少主要受降水和气温变化的影响，人类活动对高海拔山区的影响较小。

3.1 径流变化对降水变化的响应

降水是疏勒河流域3条河流出山径流量变化的主要驱动因素。疏勒河流域属于祁连山西部，流域地形和海拔高差相对较大，不同海拔区域的气候特征十分明显，降水从水汽的来源和出现频率来看，主要受西风带影响较多[10-11]。然而疏勒河流域有观测资料的气象站点很少，仅有鱼儿红雨量站，因此，

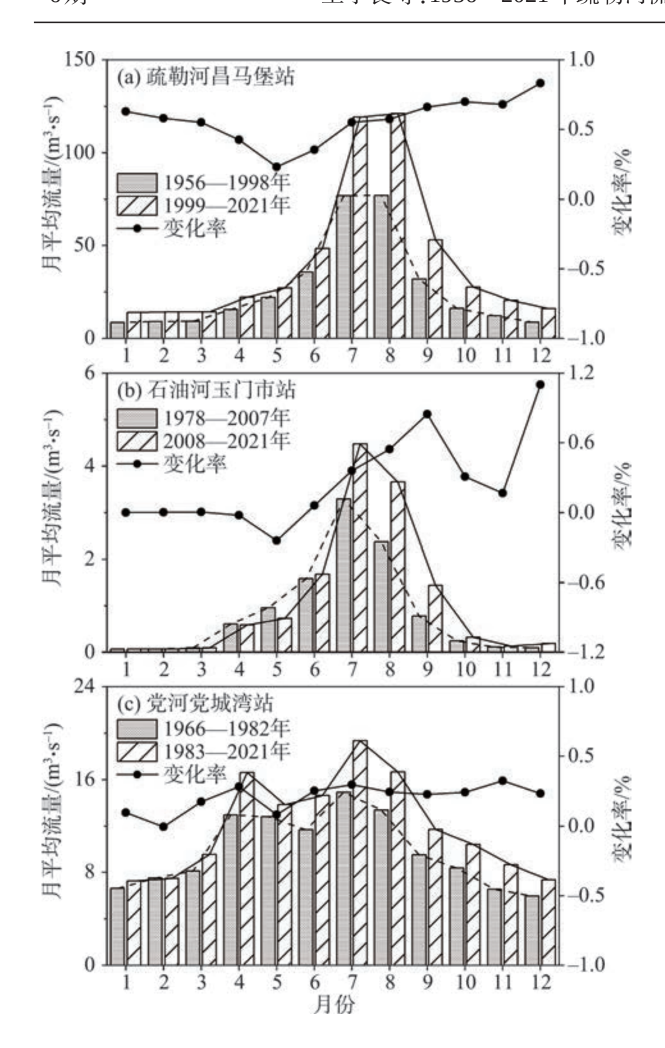


图4　1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站月径流量分配

Fig. 4　Monthly runoff distribution at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

采用中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)(国家青藏高原科学数据中心)的再分析数据[26-28]，绘制疏勒河、石油河和党河出山口以上区域降水变化趋势(图5)，并参考鱼儿红和托勒气象站资料对比分析降水的变化趋势。

图5a、图5c、图5e表明，1979—2018年疏勒河流域3条河流出山口以上区域年降水量总体呈现微弱增加趋势，其中疏勒河、石油河和党河多年平均降水量分别为272.9 mm、216.5 mm和329.1 mm，变化率为10.4 mm·(10a)$^{-1}$、11.3 mm·(10a)$^{-1}$和11.3 mm·(10a)$^{-1}$。从图6可以看出，相比石油河和党河，疏勒河降水径流相关性较好，达到0.4；石油河和党河降水径流相关性较弱，为0.2。关于祁连山区降水量的研究，蓝永超等[22]发现，祁连山区西北降水量总体上为增加态势，1990s以前为少雨年，1990s后至2010s为多雨年。徐浩劼等[32]研究发现，1961—2010年疏勒河上游降水呈现增加趋势，且在1998年左右降水发生由少到多的突变；张鹏等[17]研究表明，1956—2011年气温、降水和径流量均在1997年发生了明显的正突变，呈现明显的增加趋势。参考托勒和鱼儿红气象站的降水量变化趋势，对比3条河流径流量和降水量变化趋势图(图2和图5)，发现疏勒河在1956—1998年径流变化趋势出现平稳期，石油河在1990s后径流出现增加趋势，和党河在1995—2014年出现微弱下降期与降水变化趋势较为一致。

3.2　径流变化对气温变化的响应

气温也是影响疏勒河流域3条河流径流量的重要因素。过去60 a时间，气温的升高或降低对流域内冰雪消融和冻土覆盖区产汇流等过程产生了重要影响。由于疏勒河流域内无实测气温数据，采用临近托勒气象站的气温数据分析温度变化趋势。由图7可知，1956—2021年托勒站年平均气温总体表现为微弱上升趋势，变化率为0.36 ℃·(10a)$^{-1}$。已有研究结果也表明，1956—2010年疏勒河源区与出山口的年平均气温分别以0.40 ℃·(10a)$^{-1}$和0.34 ℃·(10a)$^{-1}$的速率显著波动上升[22]。Chen等[8-9]研究表明，中国西北干旱区气温的低温极值在1986年左右发生突变，突变后气温发生了显著增强变化。由托勒气象站的气温趋势变化图(图7)显示，1956—1986年气温基本维持在一个平稳的态势，多年均值为-3.07 ℃；而1987—2021年气温显示为持续增加的趋势，多年均值为-1.81 ℃。疏勒河、石油河和党河的气温年变化率因区域位置不同略有不同，但变化的大体趋势一致。

在气温升高背景下，以冰川等冰冻圈要素变化为主导因素的下垫面变化，对西部寒区流域径流的年际和年内分配以及产流机制已产生了显著的影响[12]。疏勒河、石油河和党河出山口以上高海拔山区有冰川和冻土发育。根据孙美平等[33]和刘时银等[34]研究成果，第一次冰川编目(1956—1983年)和第二次冰川编目(2005—2010年)数据表明，疏勒河冰川覆盖面积和冰储量为660条河509.87 km²左右，均为祁连山最大；党河为318条203.77 km²左右。丁永建等[35]研究也表明，在气候变暖影响下，1960年以来祁连山疏勒河冰川融水呈现增加趋势，冰川融水在未来10~20 a会出现冰川融水的拐点，研究区

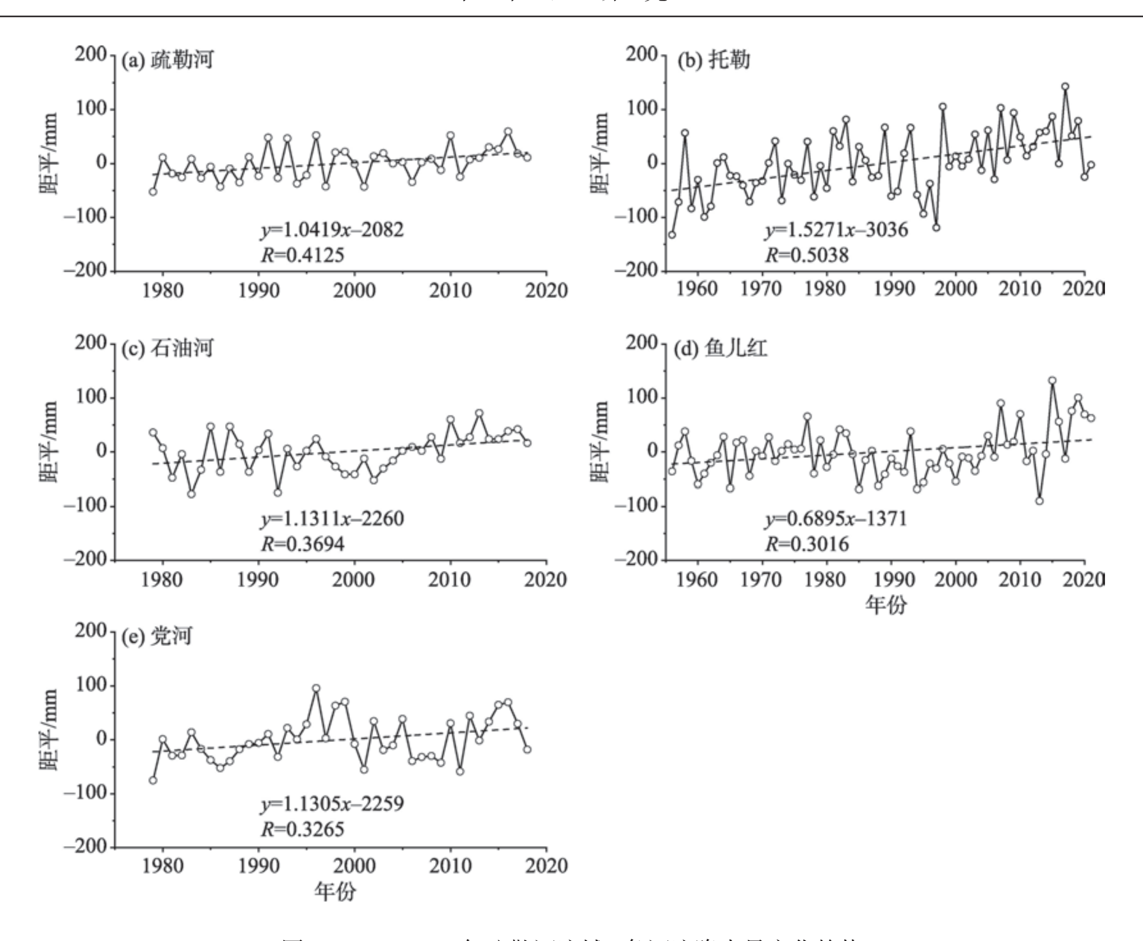


图5 1956—2021年疏勒河流域3条河流降水量变化趋势

Fig. 5 Trends in precipitation of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

过去几十年温度逐年升高导致冰川融水增加。Liu等[36]研究发现，1960s—2010s期间，在气候持续变暖影响下，冰川融水对疏勒河、石油河和党河的融水占比分别为42.2%、19.3%和46.8%，表明冰川融水是影响3条河流的重要补给来源。但在整个研究区，疏勒河和党河的冰川融水量占总径流量的比例超过40%，影响较大，而冰川融水占比较小的石油河仅为20%左右，相对以上2条河流较小。

近几十年来，疏勒河上游流域冻土退化已对流域水文过程产生了显著影响。牛丽等[37]研究发现，疏勒河上游流域多年冻土覆盖率为73%，气温升高引起多年冻土的逐渐退化，冻土层的隔水作用减弱甚至消失，加上地表水的下渗，从而导致疏勒河流域冬季(枯水)径流显著增加(图8)。同时，多年冻土面积缩小、活动层加厚等均会导致流域地下水水库库容增加，调节能力加强，进而导致疏勒河流域径流年内径流过程线和冷季退水过程线变缓[37-39]。多年冻土退化的这一水文效应是一个缓慢的过程，因此多年冻土退化对径流过程的影响也是一个渐变过程。

综上所述，降水和气温是疏勒河流域3条河流出山径流量变化的主要驱动因素。整个研究区降水总体呈现波动性增加的趋势，气温在1986年后加速上升，气温升高引起了冰川等冰冻圈要素变化并对河流径流量的增加产生了重要贡献。这也是除了降水以外，冰冻圈要素对河流径流的年际和年内产流机制产生重要影响的原因。

4 结 论

(1) 1956—2021年疏勒河流域主要河流出山径流量总体呈现增加趋势，疏勒河和党河为显著性增加趋势，石油河为非显著性增加趋势。

(2) 3条河流不同年代际径流量丰枯变化不同。疏勒河1950s—1990s为枯水期，2000s以后为丰水期，2010s为丰水期最大值。石油河1980s—2000s为枯水期，2010s出现丰水期，2020s初期又出现枯水期。党河1960s—1980s为枯水期，1990s以后为丰水期，2010s为丰水期最大值。

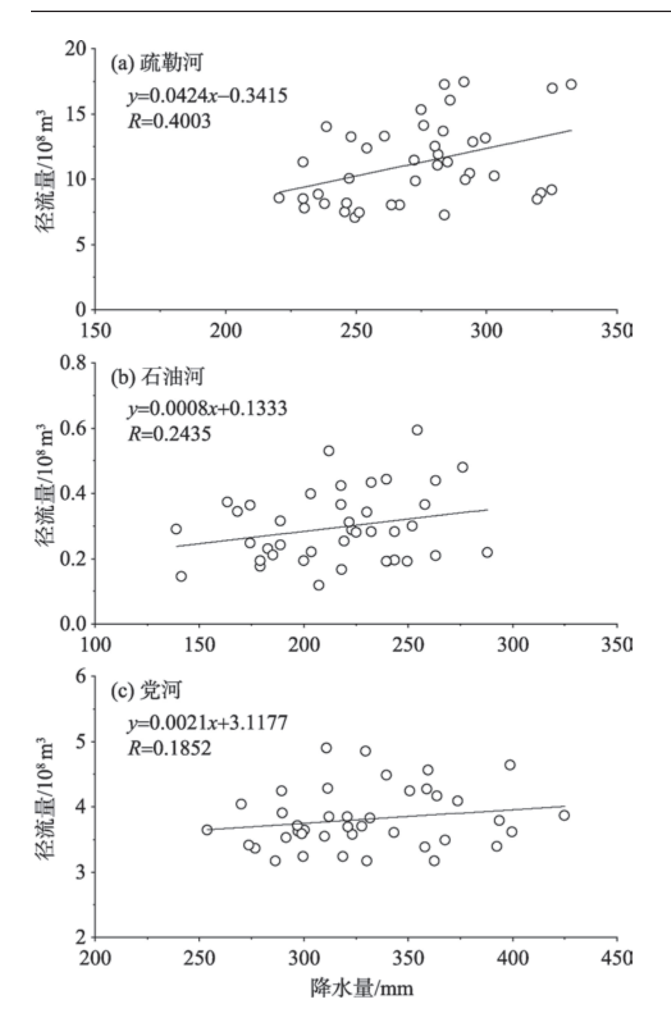


图6　1979—2018年疏勒河流域3条河流降水径流变化关系

Fig. 6　Relationship between precipitation and runoff change of three rivers in the Shule River Basin from 1979 to 2018

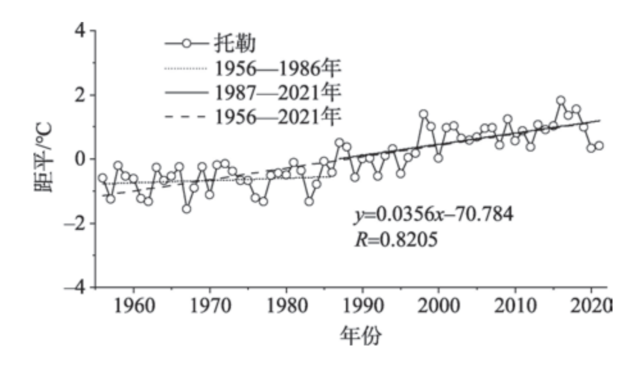


图7　1956—2021年托勒气象站气温变化趋势

Fig. 7　Trend of temperature change at meteorological station of Tuole from 1956 to 2021

（3）3条河流出山径流量的突变年份不同，疏勒河出现在1998年，石油河出现在2007年，而党河出现在1982年。突变前后年际和年内径流量产生了明显变化，突变后年际径流量明显增加，变化率疏

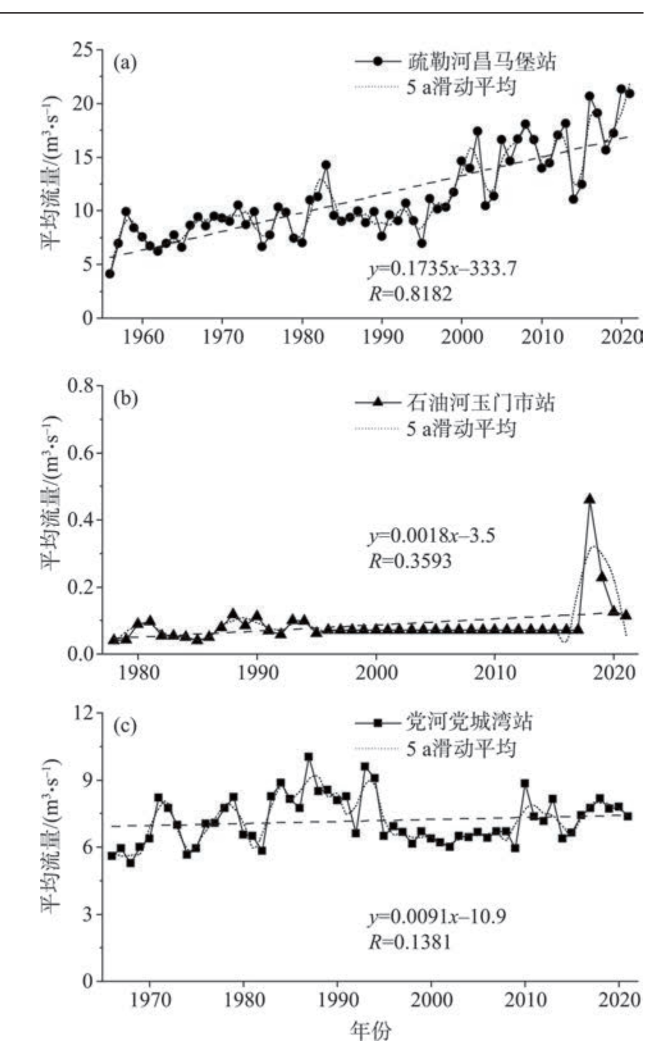


图8　1956—2021年疏勒河流域3条河流水文站冬季径流量变化趋势

Fig. 8　Trends of winter runoff at hydrological stations of three rivers in the Shule River Basin from 1956 to 2021

勒河最大，为60%，而石油河和党河分别为26%和23%。年内分配除石油河春季为非显著性减小外，其余均为增加趋势，突变后年内各月分配过程线变的更加陡峭，疏勒河变化最为显著。

（4）气温和降水是疏勒河流域3条河流出山径流量变化的主要驱动因素。整个研究区降水总体呈现波动性增加的趋势，气温在1986年后加速上升引起冰川加速消融，受降水和气温的共同影响，3条河流出山径流量的年平均和各季节流量均为增加态势。多年冻土退化是导致疏勒河冬季流量增加的主要原因。

参考文献（References）：

[1]　IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate

Change 2021: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2021.

[2] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041. [Ding Yihui, Wang Huijun. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China[J]. Chinese Journal, 2016, 61(10): 1029-1041.]

[3] 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 370-378. [Yan Zhongwei, Ding Yihui, Zhai Panmao, et al. Re-assessing climatic warming in China since the last century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 370-378.]

[4] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估(I):中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9. [Qing Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Assessment of climate and environment changes in China (Ⅰ): Climate and environment changes in China and their projection[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1): 4-9.]

[5] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. [Zhang Jianyun, Wang Guoqing, Jin Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161.]

[6] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273. [Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2019, 34(11): 1264-1273.]

[7] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]

[8] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China[J]. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.

[9] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1-9. [Chen Yaning, Wang Huaijun, Wang Zhicheng, et al. Characteristics of extreme climatic/hydrological events in the arid region of northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 1-9.]

[10] Chen Rensheng, Han Chuntan, Liu Junfeng, et al. Maximum precipitation altitude on the northern flank of the Qilian Mountains, Northwest China[J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1696-1710.

[11] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633-643. [Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilian Mountains[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 633-643.]

[12] 陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 45-73. [Chen Rensheng, Zhang Shiqaing, Yang Yong, et al. The Impacts of Cryospheric Changes on Cold Region Runoff in Western China[M]. Beijing: Science Press, 2019: 45-73.]

[13] Wang Huaijun, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Runoff responses to climate change in arid region of northwestern China during 1960-2010[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(3): 286-300.

[14] He Yi, Jiang Xiaohui, Wang Ninglian, et al. Changes in mountainous runoff in three inland river basins in the arid Hexi Corridor, China, and its influencing factors[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 1-7.

[15] Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview- science direct[J]. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(4): 268-278.

[16] 李培都, 司建华, 冯起, 等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 52-60. [Li Peidu, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 52-60.]

[17] 张鹏, 张钰, 罗颖, 等. 疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 165-172. [Zhang Peng, Zhang Yu, Luo Ying, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule River to climate change of upstream[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 165-172.]

[18] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557-567. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Ma Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 557-567.]

[19] 张文春. 疏勒河干流中上游径流量变化趋势研究[J]. 地下水, 2019, 41(2): 155-156, 211. [Zhang Wenchun. Study on the trend of runoff in the middle and upper reaches of the Shule River main stream[J]. Ground Water, 2019, 41(2): 155-156, 211.]

[20] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 907-917. [Li Hongyuan, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 907-917.]

[21] Wu Jinkui, Li Hongyuan, Zhou Jiaxin, et al. Variation of runoff and runoff components of the upper Shule River in the Northeastern QinghaiTibet Plateau under climate change[J]. Water, 2021, 13

(23): 3357.

[22] 蓝永超, 胡兴林, 丁宏伟, 等. 气候变暖背景下祁连山西部山区水循环要素的变化——以疏勒河干流上游山区为例[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 675-680. [Lan Yongchao, Hu Xinglin, Ding Hongwei, et al. Variation of water cycle factors in the western Qilian Mountain area under climate warming: Taking the mountain watershed of the main stream of Shule River basin for example[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 675-680.]

[23] 李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 803-810. [Li Jisheng, Hu Xinglin, Huang Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River Basin, Hexi Corridor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 803-810.]

[24] 李雅培.气候变化背景下疏勒河流域出山径流模拟与预测研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. [Li Yapei. Simulation and Prediction of the Mountainous Runoff in the Shule River Basin under Climate Change[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.]

[25] 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958-2015年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1894-1899. [Yang Chunli, Lan Yongchao, Wang Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River Basin in 1958-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(12): 1894-1899.]

[26] 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979 - 2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2019, doi:10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file. [Yang Kun, He Jie. China meteorological forcing dataset (1979-2018). National Tibetan Plateau Data Center, 2019, doi:10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.]

[27] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-11.

[28] Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150: 38-46.

[29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[30] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945, 13(3): 245-259.

[31] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1975, 25(1): 86-91.

[32] 徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近50年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. 西安理工大学学报, 2014, 34 (4): 40-45, 52. [Xu Haojie, Yang Taibao, Zhang Xiaoxiao. Climate change in upstream area of Shule River and its effects on runoff-yield in last 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 40-45, 52.]

[33] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414. [Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised first and second Chinese glacier inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1402-1414.]

[34] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[35] 丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702. [Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690-702.]

[36] Liu Guohua, Chen Rensheng, Li Kailu. Glacial change and its hydrological response in three inland river basins in the Qilian Mountains, western China[J]. Water, 2021, 13(16): 2213.

[37] 牛丽, 叶柏生, 李静, 等. 中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 85-92. [Niu Li, Ye Baisheng, Li Jing, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in western China[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(1): 85-92.]

[38] Wang Xiqiang, Chen Rensheng, Han Chuntan, et al. Changes in river discharge in typical mountain permafrost catchments, northwestern China[J]. Quaternary International, 2019, 519: 32-41.

[39] Wang Xiqiang, Chen Rensheng, Liu Guohua, et al. Response of low flows under climate warming in high-altitude permafrost regions in western China[J]. Hydrological Processes, 2019, 33: 66-75.

Changes in runoff from major rivers and analysis of its causes in the Shule River Basin from 1956−2021

WANG Xueliang[1,2,3], CHEN Rensheng[1], LIU Junfeng[1], HAN Chuntan[1,3]

(1. Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Pingliang Hydrological Station of Gansu Province, Pingliang 744000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the measured runoff from the hydrological stations of Shule River, Shiyou River, and Dang River from 1956 to 2021, as well as the meteorological station of Tuole and reanalyzed meteorological data, the characteristics of runoff changes of the three rivers and their causes were analyzed using Sen's slope estimator and Mann-Kendall test. The results showed that the runoff changes of the three rivers showed an upward trend from 1956 to 2021, among which the Shule River and the Dang River showed significantly increasing trends, while the Shiyou River showed a non-significant increasing trend. The years of abrupt change for the three rivers were 1998, 2007, and 1982, respectively. The runoff increased significantly after the abrupt change, in which the Shule River increased by 60%, while the Shiyou River and the Dang River increased by approximately 20%. Runoff from the Shule River and Shiyou River was abundant during the study period after the 2000s, while runoff from the Dang River increased slowly after the 1980s and showed a historical abundance value in the early 2020s. The combined effect of increased fluctuating precipitation and accelerated glacier melting due to accelerated temperature rise after 1986 resulted in an increasing trend of both average annual and seasonal runoff for these three rivers.

Keywords: Shule River Basin; runoff from mountainous areas; variation; causal analysis